第 29 卷 第 4 期 材 料 研 究 学 报 Vol. 29 No. 4
2015 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH April 2015

全尾砂-棒磨砂新型胶凝充填材料的制备*

王有团[1] 杨志强[1,2] 李茂辉[1] 高 谦[1]

1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点试验室 北京 100083
2. 金川集团股份有限公司 金昌 737100

摘 要 将某镍矿选矿全尾砂代替部分棒磨砂作为骨料, 采用正交试验和神经网络预测模型, 制备以铁矿渣粉为活性材料、以脱硫灰、生石灰为主要激发剂的全尾砂-棒磨砂新型胶凝充填材料, 分析了该材料的微观结构及其水化产物。结果表明: 全尾砂添加质量分数为30%时, 新型胶凝充填材料3 d、7 d和28 d的抗压强度分别达到1.73 MPa、4.22 MPa和6.93 MPa, 比水泥分别提高了8.13%、51.8%和34.0%, 满足镍矿的充填强度指标。新型胶凝充填材料的主要水化产物为C-S-H凝胶, 团絮状C-S-H凝胶形成结构密实的胶凝体, 将骨料紧密粘结在一起形成较高的力学强度。用这种新型胶凝充填材料可实现30%的全尾砂利用率。

关键词 无机非金属材料, 新型胶凝充填材料, 全尾砂-棒磨砂, 铁矿渣粉

分类号 TB321, TD853 文章编号 1005-3093(2015)04-0291-08

Preparation of New Backfill Cementitious Materials with Unclassified Tailings-Rod Milling Sands

WANG Youtuan[1] YANG Zhiqiang[1,2] LI Maohui[1] GAO Qian[1**]

1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Jinchuan Group Co. LTD, Jinchang 737100, China

*Supported by National High Technology Research and Development Program of China No.SS2012AA062405.

Manuscript received August 11, 2014; in revised form September 15, 2014.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (010)62332951, E-mail: gqandwyt@163.com

ABSTRACT According to an orthogonal experimental design and neural network prediction models, a new kind of backfill cementitious materials of unclassified tailings-rod milling sands is prepared with unclassified tailings partly replaced rod milling sands as aggregates, iron slag powder as the active materials as well as desulphurized ash and quicklime as the main stimulator. Hydration products and microstructures of the backfill cementitious materials are analyzed by XRD and SEM. The results show that with addition of 30% unclassified tailings, the compressive strength of the backfill cementitious materials cured for 3 days, 7 days and 28 days reaches 1.73 MPa, 4.22 MPa and 6.93 MPa, and the corresponding increment is 8.13% , 51.8% and 34.0% respectively in comparison with the ordinary cement, and these strength values can meet the backfill strength index of Jinchuan Nickel mine. The hydration products of the new backfill cementitious materials are mainly C-S-H gel and flocculent CSH gel, which form dense gel and bond the aggregates together resulting in the high mechanical strength of the materials. Therefore, utilization of 30% unclassified tailings can be achieved for the nickel mine company through producing this new backfill cementitious materials.

KEY WORDS inorganic non-metallic materials, new backfill cementitious materials, unclassified tailings-rod milling sands, iron slag powder

胶凝材料成本是胶结充填采矿成本的重要组成部分, 影响充填法采矿的经济效益。目前水泥是充填采矿的主要胶凝材料之一, 充填费用占充填成本的1/3-1/2[1-3]。因此, 寻求低成本和高强度的新型充填胶凝材料是矿山企业的重大课题。

我国较大规模的尾矿库每年产生的尾砂达10亿吨以上。尾砂是一种廉价的矿山废料, 但含有大量的细泥颗粒。用水泥作为胶凝材料时的充填体强度很低, 因此提高了充填法采矿成本, 降低了经济效益。目前大多数矿山采用分级尾砂充填, 尾砂的利

* 国家高技术研究发展计划SS2012AA062405资助项目。
2014年8月11日收到初稿; 2014年9月15日收到修改稿。
本文联系人: 高 谦, 教授

用率仅为8.2%[4-6]。具有一定活性的废料经活化、激化后形成的胶结材料具有效率高、成本低、性能好的特点，满足尾矿胶结的要求[7-11]。使用高炉水渣、粉煤灰及赤泥等新型充填胶凝材料，应用高浓度胶结技术，可实现尾矿的高效利用[12-14]。Mostafa Benzaazoua及Erol Yilmaz等研究了含硫较高的尾砂在矿山充填中的应用，发现尾砂添加量及胶凝材料种类对充填体的强度有重要影响[15-19]。低成本新型充填材料的开发与全尾砂综合利用不仅可以降低矿山充填成本，提高经济效益，还可以减少废弃物排放保护矿山环境。因此开发全尾砂-棒磨砂混合料的新型胶凝充填材料，具有重大的经济效益和环境效益。本文将某镍矿选矿全尾砂代替部分棒磨砂作为骨料，采用正交试验和神经网络预测模型制备以铁矿渣粉为活性材料、以脱硫灰、生石灰为主要激发剂的全尾砂-棒磨砂新型胶凝充填材料。

1 实验方法

1.1 胶凝材料

实验用胶凝材料主要有铁矿渣粉、脱硫灰、生石灰及32.5R水泥，芒硝、亚硫酸钠及氯化钠为早强剂。新型胶凝充填材料中铁矿渣粉为主要的胶凝材料，由铁厂水淬铁渣磨成粉状，密度为2.88 g/cm^3，碱度系数为1.04，属于酸性渣，矿渣质量为1.73，远高于国标的1.2，具有较高的活性，其化学成分列于表1。脱硫灰是热电厂半干法烟气脱硫副产品，为工业固体废弃物，主要成分为$Ca_2SO_3\cdot 0.5H_2O$和Ca_2SO_4。生石灰为普通建筑石灰，主要成分为CaO和MgO。

1.2 骨料

试验骨料为棒磨砂和全尾砂，骨料化学成分及物理性质列于表1和2。全尾砂取自选矿尾矿坝。由表1和2可见，这种全尾砂属于中性材料，没有胶结活性，满足矿山充填材料的要求，其密度为2.87 g/cm^3。这种全尾砂不仅粒度细，含泥量高，而且变异系数大，用水泥作为胶结材料将其应用于矿山难度较大。棒磨砂是镍矿胶结充填材料的主要骨料。

1.3 材料的制备和表征

将铁矿渣粉作为活性材料，利用脱硫灰、生石灰及芒硝作为激发剂，对活性矿渣粉进行胶结激发试验。全尾砂代替部分棒磨砂作为充填骨料，分别设置2∶8、3∶7及4∶6(全尾砂∶棒磨砂)3个比例，制备混合料的新型胶凝充填材料。试验运用正交设计，因素与水平列于表3，试验胶砂比为1∶4，料将浓度为78%，材料添加量均为质量分数。

用标准三联磨具(70 cm×70 cm×70 cm)总共浇筑9组充填材料试块，试块经标准恒温恒湿养护箱养护(养护温度为20℃，湿度为96%)后，采用万能压力机测试3 d, 7 d, 28 d抗压强度。

用改进的BP神经网络，将强度试验的前7组数据作为训练样本，最后两组作为测试样本，进行学习训练建立神经网络强度预测模型。使用强度预测模型，设置不同的生石灰、脱硫灰及芒硝的添加质量浓度梯度，对2∶8、3∶7和4∶6(全尾砂:棒磨砂)3个比例的新型胶凝充填材料强度进行预测。对3 d、7 d、28 d的抗压强度预测数据运用DPS数据处理系统进行二次多项式逐步回归分析，然后使用MATLAB优化工具箱，根据镍矿胶结充填的强度要求，以$R_{3d}\geqslant 1.5$ MPa、$R_{7d}\geqslant 2.5$ MPa、$R_{28d}\geqslant 5.0$ MPa为约束条件，以$\mathrm{Max}(R_{3d}+R_{7d}+R_{28d})$为优化目标函数，对全尾砂-棒磨砂新型充填胶凝材料的配比进行优化，并对优化结果进行验

表1 材料物化特性

Table1 The physicochemical properties of materials

Sample	Silicon dioxide/%	Ferric oxide/%	Calcium oxide/%	Magnesium oxide/%	Aluminium oxide/%	Sulfur/%
Iron slag powder	35.52	-	41.35	8.15	12.14	-
Rod milling sands	63.60	3.44	1.39	3.68	5.96	-
Unclassified tailings	36.31	9.51	3.86	28.15	3.39	0.67

表2 骨料粒级特征参数

Table 2 Particle classification parameters of aggregate

Aggregate	d_{10}/mm	d_{50}/mm	d_{60}/mm	d_{90}/mm	d_p/mm	Asymmetrical coefficient (d_{60}/d_{10})
Rod milling sands	0.163	0.863	1.331	3.153	0.620	8.2
Unclassified tailings	0.002	0.034		0.144	0.037	22.5

证实验。

为了满足早期强度要求较高的镍矿充填强度指标和最大限度利用全尾砂, 选择3∶7比例, 对优化的新型充填胶凝材料的配比进一步进行早期强度试验研究。在大量探索试验的基础上, 选择亚硫酸钠和氯化钠作为早强剂, 胶砂比为1∶4, 料浆浓度为78%。

对最终确定的全尾砂-棒磨砂新型胶凝充填材料与水泥胶凝材料进行了强度对比试验分析, 试验胶砂比为1∶4, 料浆浓度为78%。并用Ultima IV型X射线衍射仪(XRD)和Quanta 250型扫描电镜(SEM)对两种胶凝材料进行水化产物和微观结构的对比分析, 以揭示两者的水化机理。

2 结果和讨论

2.1 全尾砂-棒磨砂新型充填胶凝材料的强度

以生石灰、脱硫灰、芒硝为激发剂的全尾砂-棒磨砂新型胶凝材料强度正交试验数据列于表3, 对试验数据进行了方差和最优配比分析, 分析结果在表4及图1中给出。

从图1中的试块强度平均收率与全尾砂∶棒磨砂比列的关系曲线可见, 添加全尾砂后试块抗压强度随着全尾砂添加比例的增大, 3 d、7 d抗压强度呈线性下降趋势, 而28 d抗压强度呈现上升趋势。表4中的方差分析结果也表明, 全尾砂∶棒磨砂的极差最高, 对充填材料强度影响最大, 尤其是对早期的3 d强度。随着全尾砂∶棒磨砂比值的增大3 d平均抗压强度由2∶8的1.03 MPa降低到4∶6的0.58 MPa, 降低了43.7%。全尾砂的添加有利于提高后期强度, 28 d平均抗压强度由4∶6的5.87 MPa上升到2∶8的8.83 MPa, 提高了50.4%。方差分析结果28 d最优值是4∶6, 也验证了这一点。生石灰和脱硫灰作为主要的激发剂对材料水化反应有重要的影响, 两者

表3 全尾砂-棒磨砂新型充填胶凝材料的正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal experiment with the new backfill cementitious materials

No.	Ratio of unclassified tailings with rod milling sands	Quicklime /%	Desulphurized ash /%	Mirabilite /%	Iron slag powder /%	Compressive strength / MPa		
						3 d	7 d	28 d
1	2:8	5.5	16	2	73.0	1.23	5.39	6.32
2	2:8	6.0	17	3	71.0	0.83	5.51	5.61
3	2:8	6.5	18	4	69.0	1.02	5.14	5.68
4	3:7	5.5	17	4	71.0	0.80	3.50	7.73
5	3:7	6.0	18	2	70.5	0.74	4.33	6.95
6	3:7	6.5	16	3	71.5	0.31	5.21	7.04
7	4:6	5.5	18	3	70.5	0.42	4.96	9.00
8	4:6	6.0	16	4	71.5	0.55	3.34	8.99
9	4:6	6.5	17	2	71.0	0.77	3.72	7.15

表4 正交试验数据方差分析

Table 4 Variance analysis results of the orthogonal experimental

Cube time	Parameter	Ratio of unclassified tailings with rod milling sands	Quicklime	Desulphurized ash	Mirabilite
3 d	Range(R_j)	0.45	0.12	0.10	0.39
	Optimal value	0:1	5.50	17.0	4.00
7 d	Range(R_j)	2.08	1.03	0.90	1.97
	Optimal value	0:1	6.50	18.0	3.00
28 d	Range(R_j)	2.51	1.06	0.62	0.66
	Optimal value	4:6	5.50	16.0	2.00

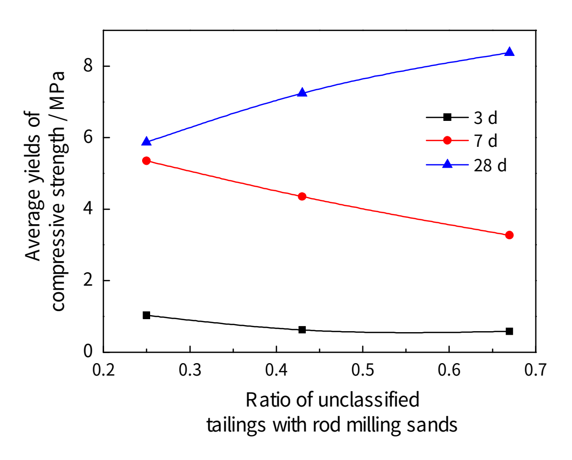


图1 抗压强度平均收率与全尾砂:棒磨砂比值的变化关系

Fig.1 Relationship between average yields of compressive strength and ratio of unclassified tailings and rod milling sands

对后期28 d强度有利, 但随着添加量的增加会降低3 d强度。芒硝作为早强剂对3 d强度有明显的增强作用, 添加量最大的4%的3 d抗压强度最高, 但添加芒硝会对后期强度有减弱作用, 因此28 d抗压强度的最佳添加量为最小值2%。实验结果表明, 7 d和28 d抗压强度平均可以达到4.16 MPa和6.71 MPa, 而3 d抗压强度最高为1.23 MPa。因此, 新型充填材料的关键是提高3 d强度, 生石灰和脱硫灰对早期强度有利的选择是5.5%-6.0%和16%-17%较小添加量。

2.2 强度预测与验证

对于神经网络强度预测模型, 绘制了3 d、7 d和28 d测试样本的网络训练结果分析图, 分别如图2a-c所示。图2中实线为仿真拟合线, 虚线为网络预测值等于试验值, R为网络输出与目标输出的相关系数。相关系数越接近1, 表明网络输出与目标输出越接近, 网络性能越好。3个预测模型的相关系数R均大于0.99, 表明该神经网络模型对充填体强度的预测精度高。使用MATLAB优化工具箱, 以$R_{3d}\geqslant$1.5 MPa、$R_{7d}\geqslant$2.5 MPa、$R_{28d}\geqslant$5.0 MPa为约束条件、以Max($R_{3d}+R_{7d}+R_{28d}$)为优化目标函数对胶凝材料配比进行优化, 得到3个比例的最优配比。最优配比及验证试验结果, 列于表5。验证试验结果表明, 建立的BP神经网络强度预测模型的预测结果具有高度的可靠性, 回归优化配比具有较高的准确性。优化的新型胶凝充填材料7 d和28 d抗压强度均能满足镍矿7 d, 2.5 MPa和28 d, 5.0 MPa充填强度要求, 但是3 d抗压强度只有2:8比例的1.91 MPa可以满足充填强度要求, 而3∶7和4∶6比例的均低于镍矿要求的3 d, 1.5 MPa。

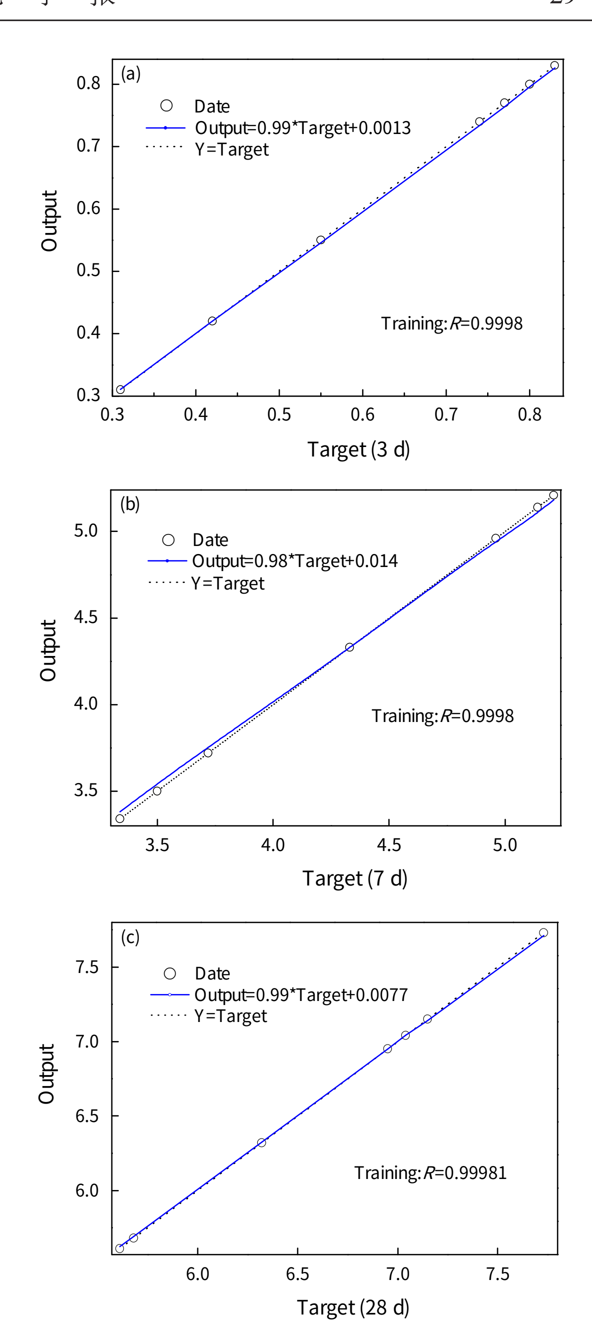


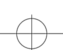
图2 神经网络强度预测模型训练结果的分析图

Fig.2 Curve of training results of the nerve network forecast model

2.3 全尾砂-棒磨砂新型胶凝材料的早期强度

为了提高全尾砂的利用率, 选择全尾砂:棒磨砂为3∶7的比例, 以亚硫酸钠和氯化钠作为早强剂, 采用五因素四水平正交扩大试验进行早强实验, 试验结果列于表6, 表中X_1、X_2、X_3、X_4、X_5和X_6分别代表生石灰、脱硫灰、芒硝、亚硫酸钠、氯化钠和铁矿渣粉的水平质量添加分数。

由表6正交水平扩大早强实验结果可见, 在优化的胶凝材料配比基础上, 通过添加亚硫酸钠和氯化钠早强剂, 3:7混合比例胶凝材料的早期3 d抗压强度得到进一步提高, 当亚硫酸钠和氯化钠添加量



为1.5%和1.5%时, 3 d抗压强度由原来的1.47 MPa升高为1.73 MPa, 提高了17.7%, 使3∶7比例(全尾砂添加质量分数为30%)的全尾砂胶凝材料的3 d抗压强度达到镍矿胶结充填强度要求。同时, 7 d和28 d的抗压强度分别达到4.22 MPa和6.93 MPa, 也满足镍矿胶结充填强度要求。最终确定全尾砂-棒磨砂新型充填胶凝材料的最佳配比为: 生石灰5.5%, 脱硫灰16.5%, 芒硝2.5%, 亚硫酸钠1.5%, 氯化钠1.5%, 铁矿渣粉72.5%。

2.4 新型胶凝材料与水泥胶凝材料的对比

全尾砂与棒磨砂4个添加比例的新型充填胶凝材料与水泥胶凝材料的强度对比的试验结果, 列于表7。结果表明, 两者的3 d抗压强度均随着全尾砂添加比例的增大而减小。新型胶凝材料的抗压强度明显高于水泥的抗压强度, 对全尾砂骨料有更好的适应性, 尤其有利于后期强度的形成。3∶7混合比例(全尾砂添加质量分数为30%)的3 d、7 d和28 d抗压强度比水泥的抗压强度分别提高了8.13%、

表5 全尾砂-棒磨砂新型充填胶凝材料强度的预测与验证结果

Table 5 Forecast and verified results of the new backfill cementitious materials orthogonal experiment

No.	Ratio of unclassified tailings with rod milling sands	Quicklime/%	Desulphurized ash/%	Mirabilite/%	Iron slag powder/%	Compressive strength of forecast value/MPa			Compressive strength of experiment value/MPa		
						3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
1	2∶8	6.2	17.6	2.0	74.6	2.03	5.20	5.28	1.91	5.27	6.00
2	3∶7	5.5	16.5	2.5	74.0	1.44	4.02	6.56	1.47	3.92	7.34
3	4∶6	5.0	16.0	3.0	72	1.18	3.55	9.86	1.14	3.72	9.84

表6 3∶7比例胶凝材料早强剂试验结果

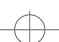
Table 6 Experimental result of early strength agents

No.	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Compressive strength of 3d/MPa	No.	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Compressive strength of 3d/MPa
1	5.0	16.5	2.0	0.5	0.0	76.0	1.43	9	6.0	16.5	3.0	2.0	0.5	72.0	1.67
2	5.0	17.0	2.5	1.0	0.5	74.0	1.36	10	6.0	17.0	3.5	1.5	0.0	72.0	1.64
3	5.0	17.5	3.0	1.5	1.0	72.0	1.64	11	6.0	17.5	2.0	1.0	1.5	72.0	1.59
4	5.0	18.0	3.5	2.0	1.5	70.0	1.68	12	6.0	18.0	2.5	0.5	1.0	72.0	1.51
5	5.5	16.5	2.5	1.5	1.5	72.5	1.73	13	6.5	16.5	3.5	1.0	1.0	71.5	1.62
6	5.5	17.0	2.0	2.0	1.0	72.5	1.59	14	6.5	17.0	3.0	0.5	1.5	71.5	1.45
7	5.5	17.5	3.5	0.5	0.5	72.5	1.44	15	6.5	17.5	2.5	2.0	0.0	71.5	1.63
8	5.5	18.0	3.0	1.0	0.0	72.5	1.63	16	6.5	18.0	2.0	1.5	0.5	71.5	1.47

表7 新型充填胶凝材料与水泥胶砂试验结果对比分析

Table 7 Contrastive analysis of mortar experiment with new backfill cementitious materials and cement

Ratio of unclassified tailings with rod milling sands	Compressive strength /MPa (Cement 32.5R)			Compressive strength/MPa (new backfill cementitious materials)		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
2∶8	2.01	3.62	4.99	2.27	5.58	5.87
3∶7	1.60	2.78	5.17	1.73	4.22	6.93
4∶6	1.28	3.25	5.27	1.34	3.86	8.25



51.8%和34.0%, 克服了水泥与全尾砂早期强度较低的缺点。

此镍矿目前主要充填胶结材料为矿用32.5水泥, 其成本为320元/t, 而新型胶凝充填材料成本仅为168.7元/t。按充填浓度78%, 胶沙比1∶4, 水泥密度0.31 g/cm^{3}计算, 添加30%的全尾砂代替棒磨砂可节约充填骨料成本22.8元/m^3(2.65×46×4/5×78%×30%), 节约充填胶凝材料成本7.3元/m^3[0.31×(320-168.7)×1/5×78%], 节约充填总成本30.1元/m^3。

图3a和b分别给出了新型充填胶凝材料与水泥胶凝材料全尾砂-棒磨砂胶砂试验不同龄期XRD谱。可以看出, 两者的水化过程基本上相同, 水化产物衍射峰的2θ段主要位于20°−30°之间, 新型充填胶凝材料水化产物主要以水化硅酸钙凝胶(C-S-H)为主, 水泥水化产物以钙矾石AFT[$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}$·$26H_2O$]为主, 两者还有生石灰水化产物氢氧化钙及少量未参加水化反应的石膏成分。水化反应的3 d龄期时, XRD谱中2θ为26.8、29.7、39.6θ时出现隆起峰, 说明有钙矾石和C-S-H凝胶生成; 2θ为20.8和36.2的特征峰分别为脱硫灰主要成分石膏和水化初始阶段产物氢氧化钙。随着龄期的增加, 石膏和氢氧化钙进一步参与了水化反应, 转化生成钙矾石和C-S-H凝胶, 峰值降低, 含量减小。AFT和C-S-H凝胶的峰值随着龄期的增加而不断增大, 且28 d已达到了较高的峰值, 说明随着水化反应生产了大量的钙矾石和C-S-H凝胶。相比较, 钙矾石的峰值水泥高于新型胶凝材料, 尤其是3 d的峰值, 这说明了水泥胶凝材料水化反应较快。而C-S-H凝胶的峰值新型胶凝材料高于水泥, 尤其是28 d的峰值, 说明新型胶凝材料对提高后期强度效果非常显著。水化反应的最终主要胶凝产物钙矾石和C-S-H凝胶, 与骨料紧密粘结构成整体, 共同形成了充填体的整体强度。主要水化反应式为

$$3CaO\cdot SiO_2+2CaO\cdot SiO_2+H_2O\rightarrow$$

$$2CaO\cdot SiO_2\cdot nH_2O+Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$Ca(OH)_2+SiO_2+H_2O\rightarrow C-S-H \quad (2)$$

图4a-c给出了新型充填胶凝材料全尾砂-棒磨砂胶砂试验不同龄期水化产物的SEM像, d-f为水泥胶凝材料全尾砂-棒磨砂胶砂试验不同龄期水化产物的SEM像。由图4可见, 该水化产物的成分与图3中的XRD分析相吻合。图像显示, 水泥水化产物以针状AFT为主, 新型胶凝充填材料水化产物以团絮状C-S-H凝胶为主。3 d龄期时两种胶凝材料都有针状AFT和片状氢氧化钙生成, 水化产物中间存在较大的空隙。新型胶凝充填材料的AFT较少, 而氢氧化钙的含量较高, 主要是生石灰中CaO的水化产物。随着水化反应的进行有大量团絮状C-S-H凝胶生成, 絮状C-S-H凝胶与较少的针状AFT相互交错生长粘结在一起。7 d龄期时水化产物中片状氢氧化钙晶体减少, 水化产物之间的结构空隙明显变小。28 d龄期时絮状C-S-H凝胶与针状AFT粘结更加密实, 表明水化程度和水化产物的结晶程度越来越高, 晶体颗粒明显增大, 充填体强度也相应增强。新型胶凝材料的水化产物以C-S-H凝胶为主, 结构非常密实, 很少有空隙存在, 这也是新型胶凝材料后期强度显著增强的主要原因。水化胶凝产物填充在骨料空隙中间将骨料紧密粘结在一起, 构成强度整体, 使胶结充填体的强度大大提高。

(a)
Ettringite
Calcium silicate hydrate
Calcium hydroxide
Gypsum
28 d
7 d
3 d
10 20 30 40 50 60 70 80
2θ / (°)

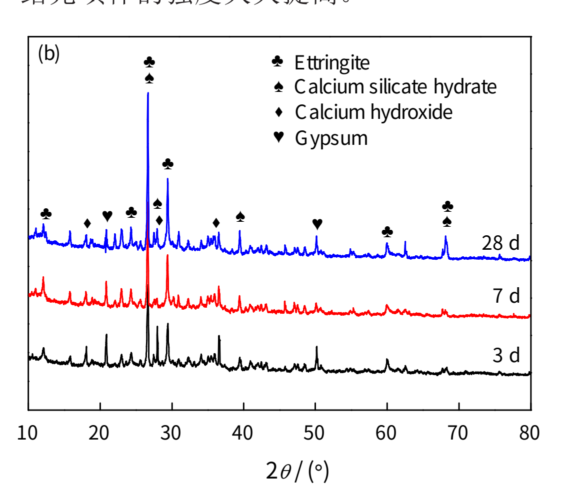


图3 新型充填胶凝材料与水泥胶凝材料全尾砂-棒磨砂胶砂试验不同龄期XRD谱

Fig.3 XRD spectra of hydration products, (a) new backfill cementitious materials, (b) cement

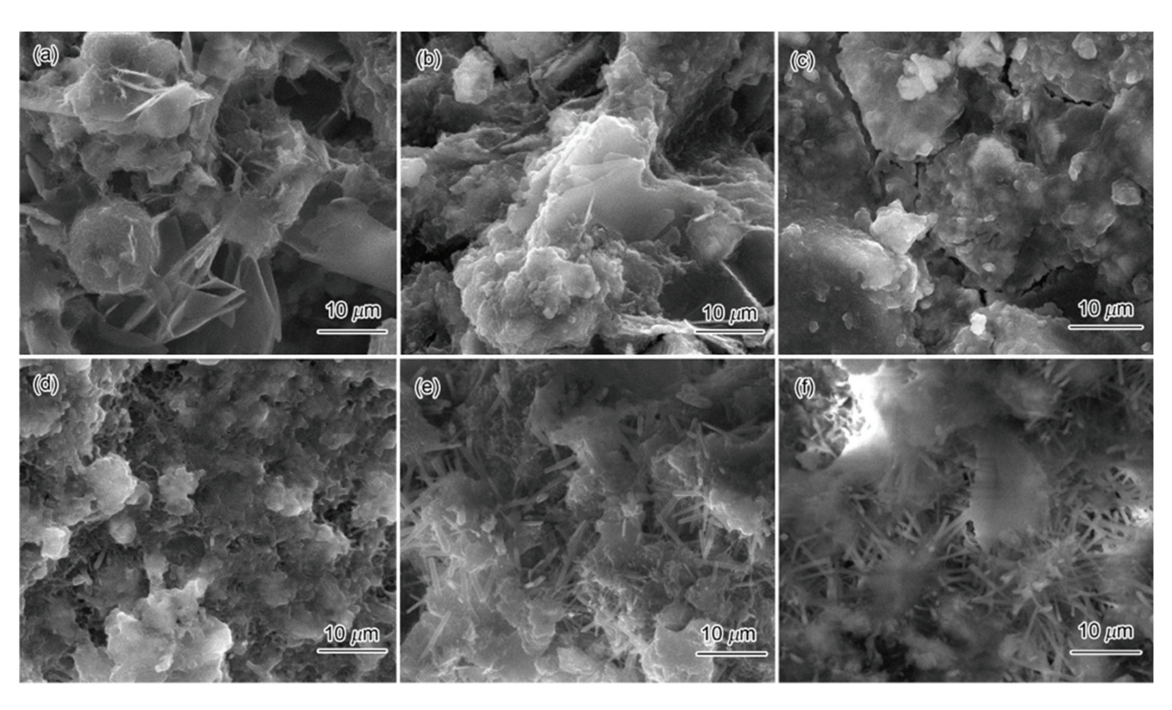


图4 新型充填胶凝材料全尾砂-棒磨砂胶砂和水泥胶凝材料全尾砂-棒磨砂胶砂不同龄期水化产物的SEM像

Fig.4 SEM images of new backfill cementitious materials (a-c) and cement (d-f), (a, d) cured for 3 d, (b, e) cured for 7 d, (c, f) cured for 28 d

3 结 论

1. 使用神经网络强度预测模型和MATLAB优化工具箱得到了全尾砂-棒磨砂新型充填胶凝材料的优化配比, 根据优化配比早强试验结果确定了最终的配比为: 生石灰5.5%, 脱硫灰16.5%, 芒硝2.5%, 亚硫酸钠1.5%, 氯化钠1.5%, 铁矿渣粉72.5%。此胶凝材料可使全尾砂添加质量分数为30%的3 d、7 d和28 d抗压强度分别达到1.73 MPa、4.22 MPa和6.93 MPa, 满足镍矿充填强度指标。

2. 与水泥胶凝材料相比, 新型胶凝材料对全尾砂骨料有更好的适应性, 尤其有利于后期强度的形成。3∶7比例(全尾砂添加质量分数为30%)的3 d、7 d和28 d抗压强度比水泥分别提高了8.13%, 51.8%和34.0%, 克服了水泥与全尾砂早期强度较低的缺点。

3. 新型胶凝材料水化产物的组成以C-S-H凝胶为主, 水化初期有较多片状氢氧化钙及少量AFT生成, 结构空隙较大。随着水化反应的进行, 团絮状C-S-H凝胶结构变得非常密实, 填充在骨料空隙中间将骨料紧密粘结在一起, 空隙很少, 使胶结充填体的强度大大提高。

参 考 文 献

1 ZHOU Aimin, *Cemented Filling with Mining Wastes*(Beijing, Metallurgical Industry Press, 2007)p.50
(周爱民, *矿山废料胶结充填*(北京, 冶金工业出版社, 2007)p.50)

2 YU Runcang, Development and innovation of cemented filling technology in China, J. China Mine Engineering, **39**(5), 1(2010)
(于润沧, 我国胶结充填工艺发展的技术创新, 中国矿山工程, **39**(5), 1(2010))

3 ZHAO Chuanqin, HU Nailian, Development and application of cementing filling materials, J. Gold, **29**(1), 25(2008)
(赵传卿, 胡乃联, 充填胶凝材料的发展与应用, 黄金, **29**(1), 25(2008))

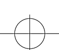
4 MENG Yuehui, NI Wen, ZHANG Yuyan, Current state of ore tailings reusing and its future development in China, J. China Mine Engineering, **39**(5), 4(2010)
(孟跃辉, 倪 文, 张玉燕, 我国尾矿综合利用发展现状与前景, 中国矿山工程, **39**(5), 4(2010))

5 ZHANG Deming, WANG Li, ZHAO Bin, Cemented backfilling technology with unclassified tailings based on active materials, J. China Mine Engineering, **39**(2), 6(2010)
(张德明, 王 莉, 赵 彬, 基于活性材料的全尾砂胶结充填技术, 中国矿山工程, **39**(2), 6(2010))

6 ZHU Liping, NI Wen, HUANG Di, HUI Mei, GAO Shujie, Whole-tailings backfilling materials with fly ash, Journal of University of Science and Technology Beijing, **33**(10), 1190(2011)
(祝丽萍, 倪 文, 黄 迪, 惠 美, 高术杰, 粉煤灰全尾砂胶结充填料, 北京科技大学学报, **33**(10), 1190(2011))

7 DONG Lu, GAO Qian, NAN Shiqing, DU Juqiang, Performance and hydration mechanism of new super fine cemented whole-tailings backfilling materials, Journal of Central South University (Science and Technology), **44**(4), 1571(2013)
(董 璐, 高 谦, 南世卿, 杜聚强, 超细全尾砂新型胶结充填料水化机理与性能, 中南大学学报(自然科学版), **44**(4), 1571(2013))

8 XU Wenbin, DU Jianhua, SONG Weidong, CHEN Haiyan, Experiment on the mechanism of consolidating backfill body of extra-fine grain unclassified tailings and cementitious materials, J. Rock and



Soil Mechanics, **31**(5), 48(2012)
(徐文彬, 杜建华, 宋卫东, 陈海燕, 超细全尾砂材料胶凝成岩机理试验, 岩土力学, **31**(5), 48(2012))

9 B. Ercikdi, A. Kesimal, F. Cihangir, H. Deveci, I. Alp, Cemented paste backfill of sulphide-rich tailings: Importance of binder type and dosage, Cement & Concrete Composites, **31**, 268(2009)

10 XIE Changjiang, HE Zhexiang, XIE Xuwen, ZHANG Changqinget, Application of blast-furnace slag at zhangmatun iron mine, J. China Mining Magazine, (2), 31(1998)
(谢长江, 何哲祥, 谢续文, 张常青, 高炉水渣在张马屯铁矿充填中的应用, 中国矿业, (2), 31(1998))

11 LI Yifan, ZHANG Jianming, DENG Fei, Experimental study on strength characteristics of tailings cement backfilling at deep-seated mined-out area, J. Rock and Soil Mechanics, **26**(6), 865(2005)
(李一帆, 张建明, 邓 飞, 深部采空区尾砂胶结充填体强度特性试验研究, 岩土力学, **26**(6), 865(2005))

12 J. L. Provis, R. J. Myers, C. E. White, V. Rose, J. S. J. V. Deventer, X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali- activated binders, Cement and Concrete Research, **42**(6), 855 (2012)

13 A. Kesimal, E. Yilmaz, B. Ercikdi, I. Alp, H. Deveci, Effect of properties of tailings and binder on the short-and long-term strength and stability of cemented paste backfill, Engineering Geology, **123**, 288 (2011)

14 ZHU Liping, NI Wen, ZHANG Xufang, HUANG Xiaoyan, Performance and microstructure of cemented whole- tailings backfilling materials based on red mud, slag and cement, Journal of University of Science and Technology Beijing, **32**(7), 838(2010)
(祝丽萍, 倪 文, 张旭芳, 黄晓燕, 赤泥-矿渣-水泥基全尾砂胶结充填料的性能与微观结构, 北京科技大学学报, **32**(7), 838(2010))

15 M. Benzaazoua, T. Belem, B. Bussie`re, Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill, Cement and Concrete Research, **32**, 1133(2002)

16 B. Ercikdi, H. Baki, M. Izki, Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings on the long-term strength of cemented paste backfill, Journal of Environmental Management, **115**, 5(2013)

17 E. Yilmaz, T. Belema, M. Benzaazoua, Effects of curing and stress conditions on hydromechanical, geotechnical and geochemical properties of cemented paste backfill, Engineering Geology, **168**, 23 (2014)

18 C. Li, H. H. Sun, J. Bai, L. T. Li, Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 1: The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting, Journal of Hazardous Materials, **174**, 71(2010)

19 C. Li, H. H. Sun, Z. L. Yi, L. T. Li, Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 2: The residuesafter iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material, Journal of Hazardous Materials, **174**, 78(2010)

